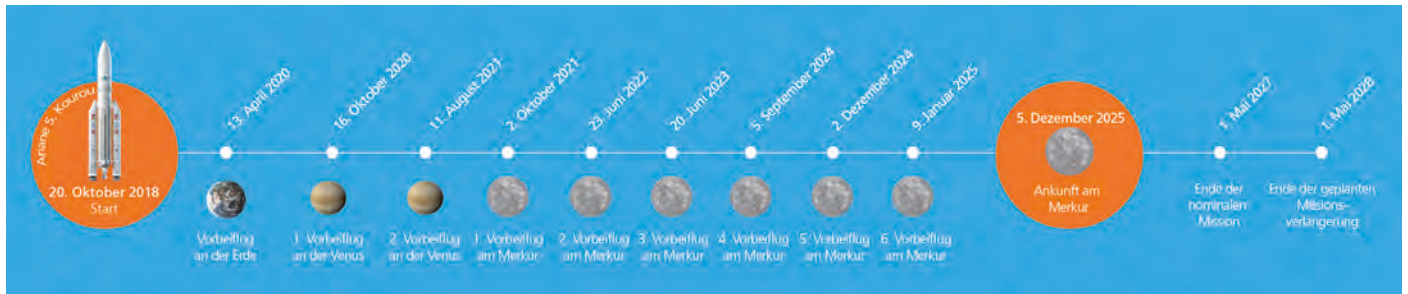


# Europa auf dem Weg zum Merkur





BepiColombo wird auf einer komplexen Flugbahn nach neun „Gravity-Assist“-Manövern im Dezember 2025 sein Ziel erreichen und dann in eine Merkurumlaufbahn gelenkt

**P**laneten: Wanderer. Rastlose Gesellen am Himmelszelt. So bezeichneten die Griechen in der Antike die merkwürdigen „Wandelsterne“, die vor dem fixen Hintergrund der Lichtpunkte des Universums jede Nacht ihre Position ein klein wenig verändern. Wie kein Zweiter verkörpert der innerste und kleinste der acht Planeten, der **Merkur**, dieses Unstete, denn nur selten bekommt man ihn in der Dämmerung überhaupt zu Gesicht. Der Merkur ist auch im Raumfahrtzeitalter der am wenigsten erforschte Planet. Jetzt machen sich Europa und Japan daran, diesen für die Wissenschaft enorm interessanten kleinen Planeten mit der großen Orbitermission **BepiColombo** zu erforschen. Drei der insgesamt 16 Experimente an Bord wurden in Deutschland (mit-)entwickelt.

Es ist eine der Eckpfeiler-Missionen der *Europäischen Weltraumorganisation ESA* und ihre bislang größte Planetenmission: Am **20. Oktober 2018** startet BepiColombo seine Reise. Eine Ariane-5-Rakete wird das gemeinsame Großprojekt der ESA und der japanischen Weltraumagentur JAXA in den Weltraum bringen. BepiColombo, die Nutzlast in der Raketenspitze, hat eine Masse von mehr als vier Tonnen.

Eine **Transferstufe** beschleunigt BepiColombo, um dem Schwerkfeld der Erde zu entkommen und die Reise zum Merkur anzutreten. Dabei wird die Sonde von einem sogenannten solarelektrischen Ionenmotor angetrieben. Hier wird der Rückstoß nicht mit der chemischen Verbrennung von Treibstoff erzeugt, sondern von Xenon-Ionen, die von einer Kathode erzeugt, in einem Magnetfeld fokussiert und ausgestoßen werden. Solche Ionenmoto-

ren erzeugen zwar nur einen sehr geringen Schub, können diesen aber über lange Zeit liefern. So haben sie schon mehrere Langzeitmissionen an ihr Ziel gebracht.

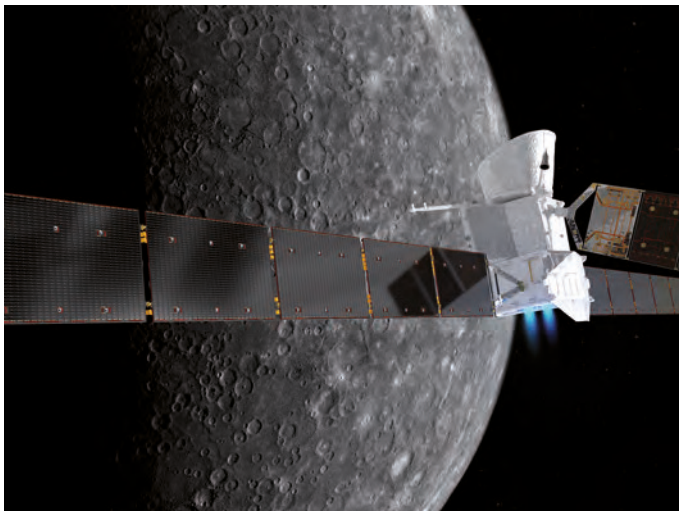
### Auf Umwegen zum Merkur

Die an der Mission beteiligten Wissenschaftler müssen sich zunächst in Geduld üben. Erst **2025** werden der europäische Planetenorbiter **MPO** (*Mercury Planetary Orbiter*) und der japanische Magnetosphärenorbiter **MMO** (*Mercury Magnetospheric Orbiter*), aus denen die BepiColombo-Mission besteht, in ihre leicht unterschiedlichen polaren Umlaufbahnen um den Merkur gelangen. Bis dahin wird sich das Sondengespann seinem Ziel auf einer komplizierten Bahn durch das innere Sonnensystem annähern: Zunächst soll es im April 2020 noch einmal nahe an der Erde vorbeifliegen, ehe zwei Passagen an der Venus folgen und von Oktober 2021 bis Januar 2025 insgesamt sechs Nahvorbeiflüge am Merkur durchgeführt werden. Diese Energie einsparenden „Swing-By-Manöver“ können bereits für die ersten Experimente genutzt werden.

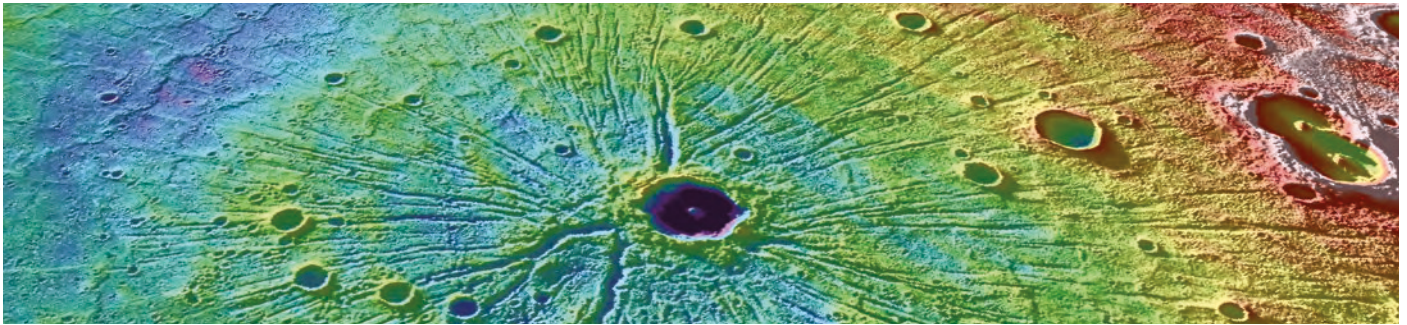
**Hauptgrund** für die lange Reisezeit ist die enorme **Anziehungskraft der Sonne**. Sie macht eine Mission zum Merkur zu einer kniffligen Angelegenheit. Hinzu kommen die hohen Temperaturen in Sonnennähe, vor denen Elektronik und Sonde geschützt werden müssen. Es war der italienische Mathematiker **Giuseppe „Bepi“ Colombo** (1920-1984), der den idealen „Bremsweg“ für die 1973 gestartete Sonde **Mariner 10** berechnete: Ihm zu Ehren trägt die aktuelle ESA-Mission seinen Namen. Damals, 1974 und 1975, pasierte die NASA-Sonde den Merkur drei Mal, fotografierte dabei knapp die Hälfte des Planeten und führte physikalische Messungen durch. Unter anderem wurde dabei das Magnetfeld des Planeten entdeckt – dem sich nun der japanische Beitrag zur Mission, der Magnetosphärenorbiter MMO widmen wird. Erst 35 Jahre später folgte 2011 **MESSENGER**, eine wissenschaftlich sehr ergiebige Mission der NASA. Mit ihr wurde der Merkur zwar vollständig erfasst, die Untersuchungen beschränkten sich jedoch aufgrund des stark elliptischen polaren Orbits auf die Untersuchung der Nordhalbkugel, der Süden blieb nach wie vor kaum erforscht: Das soll nun mit BepiColombo nachgeholt werden.

### Sonderling Merkur

Mit dem Merkur muss etwas Ungewöhnliches passiert sein, seit er sich vor viereinhalb Milliarden Jahren, nahezu zeitgleich mit den anderen Körpern des inneren Sonnensystems, im solaren



BepiColombo nähert sich dem Merkur (künstlerische Darstellung)



Topographische Bildkarte eines Teils des 1.500 Kilometer großen Kaloris-Beckens auf dem Merkur aus Daten der MESSENGER-Mission: BepiColombo wird ein global hoch aufgelöstes digitales Geländemodell des Planeten erstellen

Urnebel gebildet hat. Was genau, das fragen sich Planetenforscher seit Jahrzehnten. Der Merkur unterscheidet sich deutlich von den vier benachbarten Planeten Venus, Erde, Mond und Mars. Diese haben in etwa ähnliche Anteile von Metall tief in ihrem Inneren, das von einem Mantel aus Gestein umgeben ist. Der Merkur tanzt da vollkommen aus der Reihe.

Für viele die wissenschaftlich spannendste Frage zum Merkur ist deshalb die nach seinem **inneren Aufbau**. Der Merkur ist ungewöhnlich schwer und hat im Verhältnis zu den anderen Planeten eine viel zu große Masse. Das schlägt sich in einer Dichte von 5.300 Kilogramm pro Kubikmeter nieder, ein Wert, fast so hoch wie der der Erde. Nur hat der Merkur einen viel kleineren Durchmesser. Seine Anteile an Metallen und Gesteinen müssten, bei ähnlichem Aufbau mit Kern, Mantel und Kruste, zu einer viel niedrigeren Dichte führen. Erklärt werden kann die hohe Masse nur durch einen **sehr hohen Metallanteil** im Kern. Modellrechnungen gehen beim Merkur von etwas mehr als zwei Dritteln Eisen und nur knapp einem Drittel Gestein aus. Vermutlich ist das Eisen also in einem überproportional großen Kern konzentriert, der mehr als zwei Drittel des Volumens des Planeten und auch mehr als zwei Drittel seiner Gesamtmasse ausmacht. Entsprechend dünn, nämlich nur 600 Kilometer, ist der Gesteinsmantel aus Silikatmineralen, der den großen Eisenkern umgibt. Warum ist das so? Das und die Frage, ob der Kern teilweise geschmolzen und die Ursache für das im Innern erzeugte Magnetfeld ist, soll mit BepiColombo geklärt werden.

**Äußerlich** ist der Merkur nicht so sehr ein „Ausreißer“: Sein Antlitz ähnelt stark dem des Mondes. Wie bei diesem ist die Oberfläche von unzähligen Kratern übersät, die in der Frühzeit des Sonnensystems entstanden sind. Sie sind das Ergebnis der Einschläge von Asteroiden und Kometen. Wie beim Erdmond ist diese vernarbte Gesteinskruste ein Beleg dafür, dass der noch nicht einmal 5.000 Kilometer durchmessende planetare Körper schon seit drei, vielleicht vier Milliarden Jahren in seinem Innern keine geologischen Kräfte mehr aufbringt, die zu Veränderungen an der Oberfläche führen und die Krater – wie dies auf der Erde der Fall ist – wieder auslöschen. Allerdings gibt es auf dem Merkur außergewöhnliche tektonische Strukturen, die durch die Schrumpfung des Planeten im Zuge seiner globalen inneren Abkühlung entstanden sind. Ob Merkur noch heute tektonisch aktiv ist, auch das soll BepiColombo herausfinden.

Selbst die sich stellenweise über tausende von Quadratkilometern erstreckenden Flächen erstarrter, dünnflüssiger Lava sind über drei Milliarden Jahre alt. Mit der Entdeckung von umfangreichem **Vulkanismus** stehen die Wissenschaftler vor dem nächsten Rät-

sel: Wie kann es sein, dass sich über den Kern des Planeten ein nur wenige hundert Kilometer dicker Gesteinsmantel wölbt und sich darin doch recht voluminöse Magmablasen aus geschmolzenem Gestein bildeten? Diese Magmen stiegen auf, fanden einen Weg durch die starre Kruste und traten als dünnflüssige Flutbasalte an der Oberfläche aus. Allerdings, das zeigten bisherige spektroskopische Untersuchungen, enthalten die Gesteine merkwürdig wenig Eisen, wo doch die große Masse des Planeten mit einem hohen Eisenanteil im Inneren erklärt wird.

## Der Merkur im Sonnensystem

Auch einige **astronomische Parameter** machen Merkur zum Sonderling. Die Astronomen wundern sich über die merkwürdigen **Bahn- und Rotationseigenschaften**. Sein Weg um die Sonne weicht viel mehr als die der anderen Planeten von einer Kreisbahn ab. Am sonnenfernsten Punkt sind es knapp 70 Millionen Kilometer bis zum Mittelpunkt der Sonne, auf der gegenüberliegenden Seite der Bahn sind es nur 46 Millionen Kilometer. Für eine vollständige Umrundung des Zentralgestirns benötigt der Merkur 88 Erdentage – das ist die Länge des Merkurjahres. Um seine eigene Achse dreht sich der Planet jedoch in 59 Erdentagen. Dies führt dazu, dass sich die Länge eines Merkurtages in einer ungewöhnlichen 3:2-Resonanz mit der Umlaufzeit befindet: Während zweier Merkurjahre dreht sich der Planet dreimal um seine eigene Achse. In den Worten der Astronomen befindet sich Merkur in einer **gebrochen gebundenen Rotation**. Warum das so ist, soll geklärt werden.

Auch zwei eher exotische Aspekte sind bei der Mission von Interesse: Zum einen steht die **Drehachse** des Merkur auf seiner Bahn um die Sonne nahezu **senkrecht**. Der Merkur ist, mangels Masse, ein Himmelskörper ohne Atmosphäre, die die eingestrahelte Sonnenenergie von einem Ort zum anderen transportieren könnte (deshalb weist er die größten Temperaturunterschiede im Sonnensystem auf, von +430 Grad Celsius auf der Sonnen- seite bis zu –170 Grad Celsius auf der von der Sonne abgewandten Seite). Aber an den Polen gibt es tiefe Krater, bei denen nur der Rand von Sonnenlicht beschienen wird, den Kraterboden erreicht jedoch nie ein Lichtstrahl. Dort herrschen so extrem tiefe Temperaturen, dass sich hier gefrorenes Wasser von herabgestürzten Kometen und Asteroiden befinden könnte. Erste Hinweise dazu lieferten Radarbeobachtungen von der Erde aus, MESSENGER bestätigte diesen Befund aus dem Orbit – BepiColombo soll den endgültigen Beweis liefern.

Auch ein im Sonnensystem einmaliger Effekt lässt sich beim Merkur beobachten: Die **Bahn** des Merkurs weicht nicht nur stark von



der eines Kreises ab, auch wandert der sonnennächste Punkt (Perihel) ganz langsam rechtsläufig um die Sonne – ein Phänomen, das als **Apsidendrehung** bezeichnet wird. Das Newtonsche Gravitationsgesetz sagt hierfür einen Wert von etwa 530 Bogensekunden pro Jahrhundert voraus. Der französische Astronom **Urbain Le Verrier** stellte aber 1859 nach der Beobachtung einiger Merkurdurchgänge vor der Sonne fest, dass diese Drehung höhere Werte aufwies, nämlich 574 Bogensekunden pro Jahrhundert. Nun bringt die Sonne sechs Millionen mal mehr Masse auf die Waage als der Merkur. Deshalb – was Le Verrier zu dem Zeitpunkt noch nicht wissen konnte – tritt nahe der Sonne mehr und mehr die Allgemeine Relativitätstheorie, die **Albert Einstein** 1915 vorstellte, an Stelle des Newtonschen Gravitationsgesetzes. Sie besagt, dass die Raumzeit nahe einer großen Masse gekrümmt ist. Einstein berechnete, dass der Unterschied zwischen der Beobachtung der Merkurbahn und der kalkulierten Wirkung des relativistischen Effekts auf diese Apsidendrehung nahezu deckungsgleich sind. Pro Umlauf wandert das Perihel also um 1,4 Bogensekunden.

## Erforschung bei Hitze und Kälte

Insgesamt kommen **elf Experimente** auf dem ESA-Orbiter über einen Zeitraum von zunächst einem Erdenjahr zum Einsatz. Erstmals wird es auch von der Südhemisphäre hoch aufgelöste Bilddaten geben, sodass die globale Kartierung verbessert wird und zukünftig eine gute Grundlage für die geowissenschaftliche Interpretation des Merkurs bietet.

Gleich **mehrere Spektrometer**, die für unterschiedliche Wellenlängen des elektromagnetischen Spektrums ausgelegt sind, kommen für die mineralogische und geochemische Untersuchung und Messungen der Temperatur der Oberfläche zum Einsatz, aber auch für die Untersuchung der sogenannten Exosphäre. Zwar hat der Merkur eigentlich zu wenig Masse, um flüchtige gasförmige Stoffe in einer Atmosphäre an sich zu binden, doch schon Mariner 10 registrierte über der Merkuroberfläche Ionen von Wasserstoff, Helium und Sauerstoff. Später wurden neutrale Kalium- und Natriumatome entdeckt. Möglicherweise stammen letztere, wie auch der Sauerstoff, aus den Gesteinen der Oberfläche, die permanent von Mikrometeoriten und dem Sonnenwind „bearbeitet“ wird. Durch die hohe Impaktenergie wird das Gestein über Äonen zermahlen. Dabei verdampfen winzigste Mengen davon. Die dünne Exosphäre wird also vermutlich nicht aus dem

Innern des Planeten gespeist, sondern ist auf äußere Einflüsse zurückzuführen. Der Gasdruck der Exosphäre beträgt allerdings nur ein Billionstel des Drucks der Erdatmosphäre – ihre Bestandteile kollidieren noch nicht einmal miteinander und die Gesamtmasse der Exosphäre beträgt nur wenige Tonnen.

BepiColombo verspricht eine reiche wissenschaftliche Ausbeute, die dazu führen wird, dass auch Entstehung, Entwicklung und Eigenschaften des fünften großen Gesteinskörpers im inneren Sonnensystem besser verstanden werden. Daraus lassen sich auch Schlüsse für die Entstehung und Entwicklung der frühen Erde ableiten. Eine große Mission! ●

Ulrich Köhler

Institut für Planetenforschung

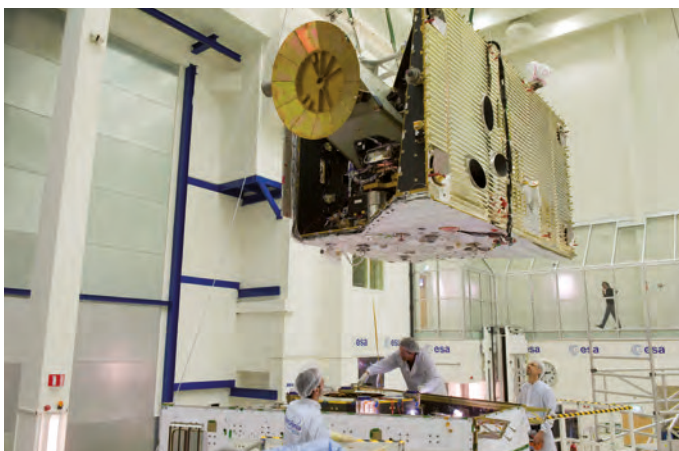
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)

## BEPICOLOMBOS EUROPÄISCHE EXPERIMENTE

Elf Experimente werden mit dem europäischen MPO der Mission BepiColombo durchgeführt, davon drei in deutscher (Mit-)Verantwortung:

- Das Laser-Experiment **BELA** (*BepiColombo Laser Altimeter*) dient der Vermessung von Form, Topographie und Rotationseigenschaften des Planeten (DLR, Universität Bern, Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung, Instituto da Astrofísica de Andalucía, Spanien).
- **MERTIS** (*Mercury Radiometer and Thermal Infrared Spectrometer*) ist ein Radiometer und abbildendes Spektrometer zur spektroskopischen Untersuchung der Planetenoberfläche (DLR und Universität Münster).
- Der Messung des Magnetfelds des Merkurs und dessen Wechselwirkung mit dem Sonnenwind dient das **Magnetometerexperiment MPO/MAG** (Technische Universität Braunschweig).
- **SIMBIO-SYS** ist das „Observatorium“ der Mission, eine Kamera für Stereoaufnahmen mit Nahinfrarot-Spektrometer für die globale Kartierung der Mineralogie (Agenzia Spaziale Italiana).
- Das **Gammastrahlen- und Neutronenspektrometer MGNS** bestimmt chemische Elemente auf und direkt unter der Merkuroberfläche und soll das Vorhandensein flüchtiger Elemente in den polaren Regionen bestätigen (Institute for Space Research, Moskau).
- Das **abbildende Röntgenstrahlen-Spektrometer MIXS** dient ebenfalls zur globalen Kartierung der Elementzusammensetzungen (Universität Leicester).
- Messungen der solaren Röntgenstrahlung und Teilchen des Sonnenwinds werden mit dem Experiment **SIXS** (*Solar Intensity X-Ray and Particle Spectrometer*) durchgeführt (Universität Helsinki).
- Mit **PHEBUS** (*Probing the Hermean Exosphere by UV Spectrometry*) wird die Exosphäre im Ultraviolett kartiert (Service d'Aéronomie/IPSL, Paris).
- Die Zusammensetzung der Exosphäre, Quellen und Senken der Bestandteile und ihre vertikale Struktur werden direkt mit dem Experiment **SERENA** (*Search for Exospheric Refilling and Emitted Natural Abundances*) gemessen (Istituto di Fisica dello Spazio Interplanetario, Italien).
- Struktur von Kern und Mantel werden mit der Analyse des Dopplereffekts im Funkverkehr zwischen Erde und Sonde mit dem Experiment **MORE** (*Mercury Orbiter Radio Science*) ermittelt (Universität Sapienza, Rom).
- Nahe der Sonne sollen relativistische Effekte bei der Beschleunigung des Orbiters mit **ISA** (*Italian Spring Accelerometer*) gemessen werden, um die Periheldrehung genau zu bestimmen (Istituto Nazionale di Astrofisica, Italien).

Bild: ESA/Annie LeFloch



BepiColombo wurde von Airbus Space Systems in Friedrichshafen gebaut und im ESA-Technologiezentrum ESTEC in Noordwijk getestet